第47卷 第3期
2024年3月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

基于土地利用变化的陕北多沙粗沙区生境质量演变及响应分析

安文举[1,2]， 鱼亦凡[1,2]， 郝姗姗[1,2]， 王英弟[1,2]， 李小兵[1,2]， 麦旭东[1,2]

（1. 黄河水土保持绥德治理监督局，陕西 榆林 718000；
2. 黄土高原水土保持与生态修复国家林业和草原局重点实验室，陕西 榆林 718000）

摘 要：针对目前陕北多沙粗沙区长时序土地利用变化下生境质量演变研究不充分的问题，通过2000、2005、2010、2015、2020年陕北土地利用类型变化、转移矩阵分析该区域土地利用变化，并基于InVEST模型对4个年周期生境质量及退化度进行评价。结果表明：(1) 陕北多沙粗沙区土地利用主要以旱地、有林地、草地、建设用地和裸土地为主。(2) 2000—2020年，裸地转出面积最大，总降幅达57.11%，主要转为草地和耕地；建设用地总增幅达272.69%，草地转出与转入面积基本持平，主要与耕地相互转换；综合土地利用动态度从1.32%降至0.61%。(3) 生境质量指数呈先增后减趋势，峰值达0.43，整体偏低，耕地扩张对生境恢复造成威胁。区域西南部生境质量较高，中部地带主要是中等级和较低等级，北部神木、府谷矿区生境质量出现高等级。2000、2020年生境退化指数均值分别为0.41和0.43，未来生境有恶化趋势，后续生态治理政策应主要从防治耕地、建设用地扩张，保护林草地类入手。研究结果可为陕北多沙粗沙区生态恢复提供数据参考。

关 键 词：土地利用；转移矩阵；InVEST模型；生境质量
文章编号：1000－6060(2024)03－0474－11(0474～0484)

土地利用和土地覆被变化(LULC)主要是指土地利用形态随时间演变而发生的动态转变过程[1]，是人类活动和自然生态环境相互作用的最终结果。近年来，由于人类活动强度加剧，土地利用及覆被变化与生态效应已经成为全球环境变化研究中的重要课题。作为生态系统的载体之一，土地利用变化会影响土壤侵蚀、能量交换、水循环和碳循环等生态过程，从而对生态系统服务产生影响[2]。生态服务系统是指通过生态结构、生态过程和生态功能直接或间接得到的、能够形成和维持人类生存和发展的环境条件和效果，关于该领域的研究，自Ehrlich在1983年系统介绍后，于1997年Costanza等开始根据效用价值和均衡价值理论等方法核算生态系统中的经济价值[3]，后逐渐成为生态领域研究的热点。生境质量作为评价生态系统服务的重要指标之一受到国内外学者广泛研究。

生境质量是指生态系统提供适宜个体与种群持续生存发展条件的能力，可以在一定程度上反应出生态健康程度以及区域生物多样性状况[4]。目前，评价生境的方法主要有基于评价体系的定性法和利用模型计算的定量法[5]，随着3S技术的不断成熟，采用地理信息系统应用程序(SolVES)[6]、栖息地适宜指数模型(HSI)[7]、生态系统服务和权衡综合评估(InVEST)模型开展生境研究已经成为精细化评价区域生态的重要方法，其中InVEST模型应用尺度最为广泛[8]。土地利用是生物多样性的基础，其变化作为人类活动最直接的表现方式，能够改变生境斑块间的能量和物质转换，最终使得生境质量变

收稿日期：2023-07-27； **修订日期**：2023-09-11
基金项目：陕西省林业科学院科技创新计划专项(SXLK2021-0206)资助
作者简介：安文举(1997-)，男，硕士研究生，工程师，主要从事水土保持监测研究. E-mail: Tenmoon25@163.com
通讯作者：李小兵(1978-)，男，本科，工程师，主要从事水土流失动态监测研究. E-mail: hhsbz@163.com

化，影响生态环境和区域生物多样性[9]。国内外学者Zheng等[10]、Chen等[11]、Yu等[12]、翟玉鑫等[13]、陈实等[14]、Tang等[15]、de Montaigu等[16]、程静等[17]分别从生境质量对LULC响应机制及时空演变、生境质量与城市化耦合作用以及考虑生物多样性与生境质量相关性等方面开展研究，为评价目标区域生态状况提供了数据支撑。

西北地区生态脆弱、气候恶劣，近年来针对该区域的研究逐渐增多，研究广度和深度亦有增强，但仍存在问题，一是目前研究集中于城市及周围，关于城市发展中对生态威胁作用的研究较多[15]；二是对于生态带的研究往往尺度较大[8,12-13]，难以准确反映局部区域生态变化情况。陕北多沙粗沙区作为黄河泥沙主要来源区之一[18]，黄土深厚，植被稀少，水土流失严重，目前对于该区域的报道依然较少。近年来，陕北多沙粗沙区先后实施了退耕还林、飞播造林、高标准农田建设等措施，期间又逢资源开发热潮，作为陕西重要的能源化工基地，大量矿区的建设和能源开采导致土地利用稳定性被打破。因此，本文以陕北多沙粗沙区为研究区，基于2000—2020年土地利用遥感数据，分析其土地利用变化、生境质量演变和生境质量对土地利用转移响应规律，探究土地转移过程中局部生态变化规律，以期为陕北多沙粗沙区生态恢复提供数据参考。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

陕北多沙粗沙区（107°15′~111°13′E，35°19′~39°35′N）地处晋陕蒙宁甘5省交界、黄河流域中上游、黄土高原北部，总面积为68266 km²（图1）。该区域总体地势为西高东低，平均海拔约1200~1500 m，多年平均降雨量约400~600 mm，平均蒸发量1200~1500 mm，属半干旱气候。该地区拥有丰富的矿产资源，对当地工业和经济发展起到了重要作用，2022年榆林市GDP达6543.65×10⁸元、延安市达2231.93×10⁸元[19]。

图1　陕北多沙粗沙区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of more sediments and coarse sediments region in northern Shaanxi

1.2　研究方法

1.2.1　土地利用动态变化　2000—2020年土地利用数据来自中国科学院空天信息创新研究院（https://data.casearth.cn/）[20]，分辨率为30 m。基于国土空间规划和国家《土地利用现状分类》2种分类原则及方法，结合陕北多沙粗沙区实际生态系统服务状况，对土地利用数据调整归类如表1所示。

表1　陕北多沙粗沙区土地利用分类

Tab. 1　Land use classification in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi

一级类	代码	二级类	代码
耕地	1	旱地	11
		水浇地	12
林地	2	有林地	21
		其他林地	22
		灌木林地	23
草地	3	草地	31
湿地	4	湿地	41
建筑用地	5	建筑、工矿、交通用地	51
裸地	6	裸土地	61
水体	7	河湖库塘	71

利用ArcGIS 10.2对陕北多沙粗沙区不同时期土地利用叠加，通过土地利用类型动态度[1]和土地利用转移矩阵[21]来分析该区域土地利用变化过程。

土地利用转移矩阵表示阶段时间内单一土地利用类型变化，其表达式[22]为：

$$C_{xy}=\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：C_{xy} 为第 y 类土地利用向地类 x 转移的面积（km^2）；x、y 为转换前后的土地利用类型，x=1, 2, 3, ···, n，y=1, 2, 3, ···, n。

土地利用动态度可以直观描述土地利用转型速率，分为单一动态度和综合动态度，单一动态度是指确定地类转化速率，其表达式为：

$$K_i=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{2}$$

式中：K_i 为研究区域内土地利用 i 的动态度（%）；U_a、U_b 分别为研究初、末期土地利用面积（km^2）；T 为年份初末期时间间隔（a）。

综合动态度是描述研究区域内全部地类转移变化速率，用来描述区域土地变化稳定程度，表达式为：

$$M=\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta U_{i-j}}{\sum_{i=1}^{n}U_i\times T}\times 100\% \tag{3}$$

式中：M 为综合动态度（%）；ΔU_{i-j} 为地类 i 转为 j 的面积（km^2）；U_i 为地类 i 初期面积（km^2）；T 为年份初末期时间间隔（a）。

1.2.2 InVEST模型 利用InVEST模型中的生境模块分析陕北多沙粗沙区生境质量及其退化度。InVEST模型是由美国斯坦福大学、大自然保护协会（TNC）与世界自然基金会（WWF）联合开发的综合性生态系统服评价模型，已被中国、美国、瑞士等国家大学及科研机构用于评估城市退化、动植物栖息地等多方面生境质量[8]。其表达式为：

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R}w_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{4}$$

式中：D_{xj} 为第 j 类土地利用中栅格 x 的生境退化程度；R 为胁迫因子数量；w_r 为胁迫因子 r 的权重；Y_r 为胁迫因子 r 中的栅格数量；r_y 为图层范围胁迫因子强度；β_x 为栅格 x 单元的受保护水平；S_{jr} 为生境 j 对胁迫因子 r 的敏感度大小；i_{rxy} 为胁迫因子与生境间的距离衰减函数，其表达式为：

$$\text{线性衰减：}i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right) \tag{5}$$

$$\text{指数衰减：}i_{rxy}=\exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right] \tag{6}$$

式中：d_{xy} 为栅格 x、y 之间的线性距离；$d_{r\max}$ 为胁迫因子 r 的最大线性影响距离。

最终生境质量计算公式为：

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)\right] \tag{7}$$

式中：Q_{xj} 为生境质量，其值介于[0, 1]之间，值越大，生境质量越高；H_j 为生境适宜度；k 为半饱和常数，一般取值为生境退化度最大值的一半；z 为归一化常数，一般取0.5。

按照InVEST模型使用手册，需要设定生境胁迫因子及权重、不同生境类型对胁迫因子敏感度表方可计算。胁迫因子是表示该种地类对周围生境的影响程度；权重值是指该地类对生境破坏性的相对程度，取值为[0, 1]；相对敏感性是指每种地类对每种胁迫因子的相对敏感程度，取值范围为[0, 1]，越接近1即对该胁迫因子敏感度越高。本研究考虑陕北多沙粗沙区土地利用特征以及人为影响等因素，结合研究侧重并查阅如陕北地区、兰州地区、黄土高原等类似区域研究成果，并根据InVEST模型手册、国内外相关研究，将旱地、建设用地、裸土地设为胁迫因子，并确定其权重、最大影响距离、衰退类型及敏感度（表2、表3）。

表2 胁迫因子及权重

Tab. 2 Threat factors and weights

胁迫因子	权重	最大影响距离/km	衰退类型
旱地	0.5	2	线性
建设用地	0.9	8	指数
裸土地	0.3	3	线性

1.2.3 土地利用转移条件下生境贡献率 为探讨生境演变对土地利用变化的响应规律，采用ArcGIS分区统计将主要土地利用变化栅格与生境质量变化栅格相对应，提取同一地类变化下生境变化规律，采用生境贡献率计算生境质量对土地利用变化的响应规律。生境贡献率是指确定地类转移前后生境质量随之变化比率[23]，其计算公式为：

$$R_{ij}=\frac{(H_j-H_i)S_i}{S_t}\times 100\% \tag{8}$$

表3　不同生境类型对胁迫因子敏感度

Tab. 3　Sensitivity of different habitat types to threat factors

土地利用类型		生境适宜性	胁迫因子		
一级类	二级类		旱地	建设用地	裸土地
耕地	旱地	0.3	0.3	0.4	0.3
	水浇地	0.4	0.4	0.4	0.4
林地	有林地	1.0	0.7	0.8	0.7
	其他林地	0.9	0.9	0.8	0.9
	灌木林地	0.8	0.7	0.7	0.7
草地	草地	0.7	0.7	0.7	0.8
湿地	湿地	0.9	0.9	0.9	0.9
建设用地	建筑、工矿、仓储用地	0.0	0.0	0.0	0.0
裸地	裸土地	0.0	0.0	0.0	0.0
水体	河湖库塘	0.9	0.7	0.8	0.7

式中：R_{ij} 为地类 i 转化为 j 地类时的生境贡献率(%)；H_i 和 H_j 分别为研究时段内地类 i、j 在变化前后的生境指数；S_i 为该变化地类 i 面积(km²)；S_t 为研究区总面积(km²)。

2　结果与分析

2.1　陕北多沙粗沙区土地利用变化及转移矩阵分析

2.1.1　土地利用面积变化分析　陕北多沙粗沙区土地利用主要以旱地、有林地、草地、建设用地和裸土地为主，2000—2020年平均占比分别为16.52%、8.43%、69.52%、0.39%和4.40%。其主要土地利用变化情况如图2所示，2000—2005年，地类变化面积最大的是裸土地、草地，变化面积分别为-1480.59 km²、1413.05 km²；2005—2010年，地类变化面积最大的是裸土地、有林地，变化面积分别为-379.90 km²、295.38 km²；2010—2015年，地类变化面积最大的是裸土地、旱地，变化面积分别为-585.48 km²、188.18 km²；2015—2020年，地类变化面积最大的是草地、旱地，变化面积分别为-519.14 km²、450.50 km²。分析原因：1999年陕北推行植树种草、封山禁牧等退耕还林措施，这可能是林地和草地面积增长、旱地和裸土地面积降低的原因。另外，2000—2020年建设用地面积持续增加，2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020年分别增加52.75 km²、74.41 km²、82.08 km²、117.84 km²，这与城市化进程加快及煤炭、天然气等资源的深度开采相对应。

2.1.2　土地利用转移情况分析　2000—2020年，耕地、草地和裸地面积转移变化较大(表4)。其中，2005—2010年草地转出与转入面积分别为1545.5 km²、1484.9 km²，均是该年周期内转移面积最大地类，说明陕北多沙粗沙区草地发生较大流转；2010—2015年，土地利用转移面积较大的是草地和裸地，转出面积分别为801.1 km²、714.0 km²；2015—2020年，草地和裸地转出面积最大，耕地转入面积最大，原因可能是2019年大力推行高标准农田建设导致。2000—2020年，建设用地主要由草地转入，2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020年转入面积分别为33.2 km²、47.8 km²、50.0 km²、67.0 km²，其次由裸地和耕地转入。

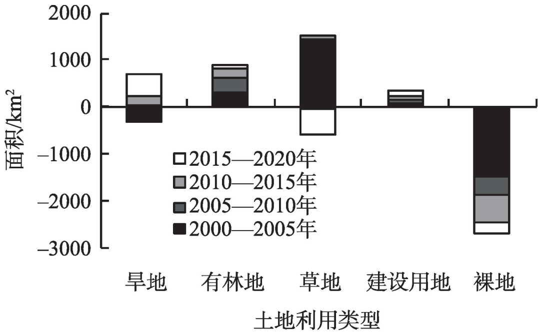


图2　2000—2020年土地利用变化

Fig. 2　Land use change during 2000—2020

2.1.3　土地利用变化动态度分析　通过计算转移变化面积较大的旱地、有林地、草地、建设用地、裸地5种二级地类土地利用变化单一动态度及所有地类综合动态度，绘制变化趋势95%置信区间散点图(图3)，分析陕北多沙粗沙区土地利用变化速率。2000—2020年除旱地单一动态度呈增加状态，有林地、草地、建设用地和裸地变化单一动态度均减小，

表4　2000—2020年土地利用转移矩阵

Tab. 4　Land use transfer matrix during 2000—2020

年周期	土地利用类型	转移面积/km²						
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	裸地	水体
2000—2005	耕地	9984.5	18.9	736.6	2.2	1.0	361.5	3.4
	林地	156.4	5266.4	235.8	0.1	0.0	18.2	0.2
	草地	1192.5	81.6	45223.7	2.8	1.5	1329.7	3.2
	湿地	7.29	0.1	10.6	78.5	0.0	3.9	1.0
	建设用地	13.3	0.0	33.2	0.1	117.2	8.9	0.0
	裸地	72.3	2.2	167.0	1.6	0.2	2969.5	1.3
	水体	7.9	0.1	15.4	3.4	0.0	3.3	110.9
2005—2010	耕地	10047.6	15.8	944.8	1.3	1.3	130.1	3.1
	林地	98.0	5574.5	307.6	0.1	0.0	7.5	0.2
	草地	875.2	84.5	46289.5	2.6	2.2	517.5	2.9
	湿地	6.3	0.1	9.2	95.1	0.0	2.1	1.8
	建设用地	17.7	0.05	47.8	0.1	168.7	12.7	0.0
	裸地	57.9	1.8	229.5	1.2	0.4	2542.9	0.6
	水体	5.5	0.3	6.6	1.0	0.0	1.3	132.3
2010—2015	耕地	10737.1	2.2	469.9	0.2	0.0	125.5	2.2
	林地	40.9	5982.4	160.0	0.0	0.0	2.4	0.1
	草地	315.2	3.1	46973.7	0.9	0.0	564.8	1.4
	湿地	4.8	0.0	8.1	113.0	0.0	2.5	0.6
	建设用地	15.8	0.1	50.0	0.1	247.1	16.1	0.0
	裸地	21.9	0.1	105.7	0.2	0.0	2120.4	0.7
	水体	8.4	0.3	7.4	0.3	0.0	2.8	142.6
2015—2020	耕地	10922.6	8.7	732.0	0.2	0.0	135.0	0.6
	林地	25.1	6157.0	128.6	0.0	0.0	4.9	0.1
	草地	298.2	18.6	46711.2	0.7	0.0	310.5	0.8
	湿地	9.0	0.0	18.9	127.0	0.0	3.3	2.7
	建设用地	28.3	0.2	67.0	0.1	329.2	22.2	0.1
	裸地	47.7	0.4	193.2	0.5	0.0	1771.6	0.4
	水体	6.3	0.8	8.1	0.5	0.0	1.5	157.2

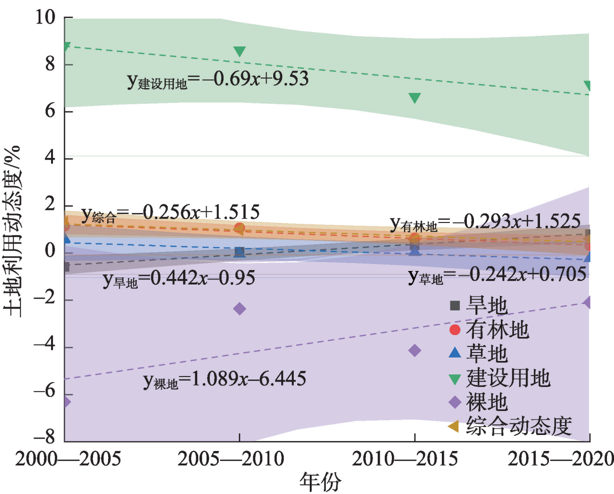


图3　土地利用动态度线性拟合

Fig. 3　Linear fitting of land use dynamics

裸地在近20 a减少面积超过50%，表明陕北多沙粗沙区土地利用流转速率逐渐降低。建设用地单一动态度在2000—2015年均呈降低状态，但在2015—2020年有所升高，达7.19%，这与2015年以后大量自然资源的开采和发掘，城市建设投入加大的情况相吻合。综合动态度从1.32%降至0.61%，说明土地利用变化速率减慢，陕北多沙粗沙区土地利用逐渐趋于稳定。

2.2　陕北多沙粗沙区生境质量动态变化情况

采用InVEST生境质量模块计算陕北多沙粗沙区2000—2020年的生境质量，并采用等间距法对其质量从低到高分为低、较低、中、较高和高5个等级，绘制生境质量等级分类图。如图4所示，2000年低等级生境主要分布在榆林市西北各县，包括横山区

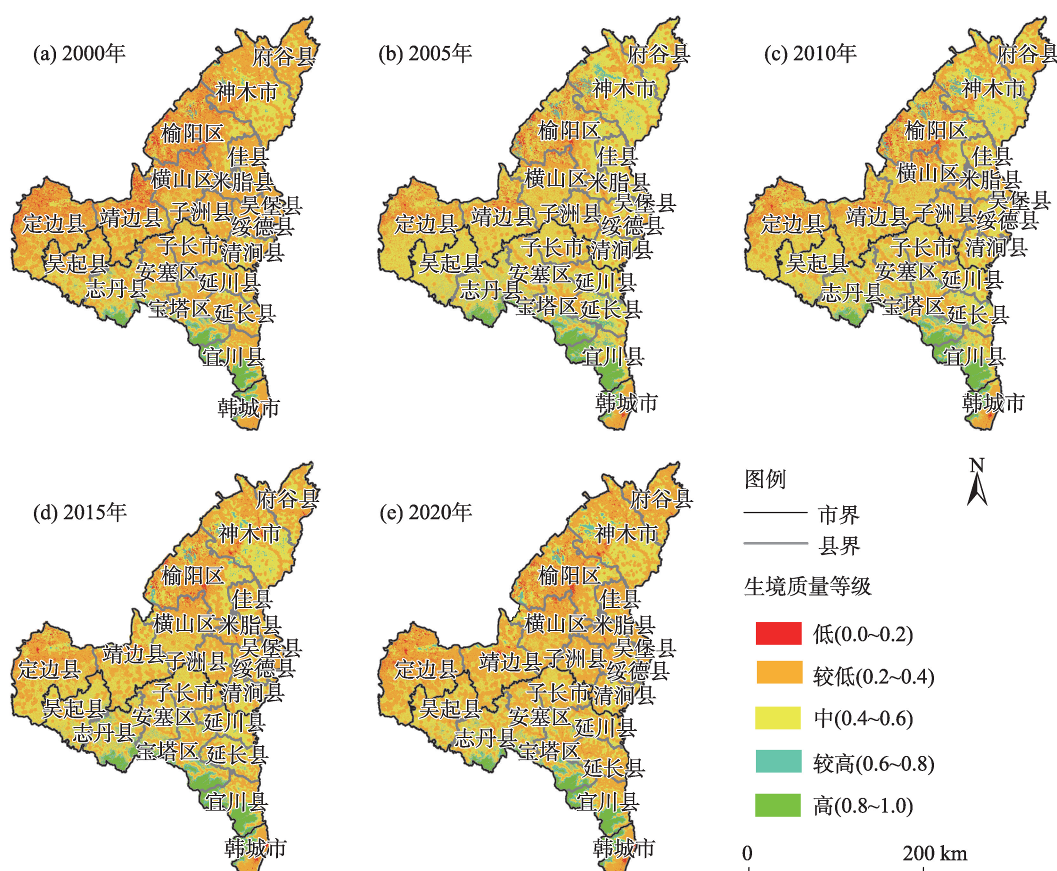


图4　陕北多沙粗沙区生境质量等级

Fig. 4　Habitat quality grades in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi

西北、靖边北部等区域，这些区域是毛乌素沙漠所在地，生境质量极差。高等级主要分布在宝塔区、宜川县西南等区域，这些区域正处于子午岭国家级自然保护区东陲，林地、草地面积占总土地利用面积的75.89%，建设用地仅占0.18%。2000—2010年，高等级生境质量带向志丹县以北、宝塔以东等地区扩张。较低生境等级在2000和2020年分布面积最广，2000年退耕还林前裸土地面积占比6.88%，到2020年仅占2.95%，但建设用地面积增加较快，2000—2020年共增加了447.05 km²，阻碍了生境质量的恢复，使得较低生境质量等级仍然分布较广。

结合图5可见，陕北多沙粗沙区生境质量指数在2005年达到峰值0.43后逐渐降低至2020年的0.37，表明该区域生境质量整体较低。低等级面积逐年减少，较低等级面积逐年增加，高等级、较高等级和中等级变化趋势与生境指数一致，均在2005年达到峰值后回落，但高于2000年水平。数据同样反映出1999年开始的生态恢复政策显著提升了陕北多沙粗沙区的生境质量，但后续城市建设和农村开发导致这一成效减弱。

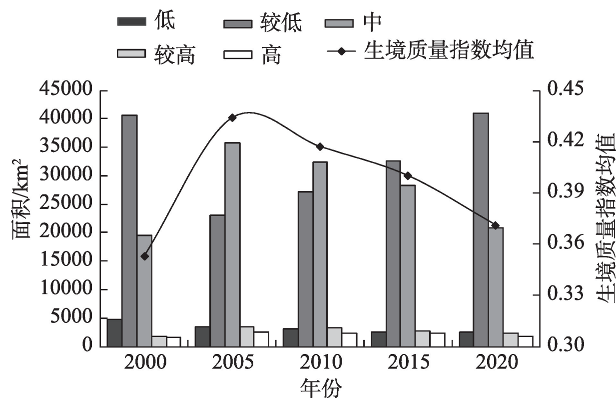


图5　不同等级生境质量面积及生境质量指数变化

Fig. 5　Changes of habitat quality area and habitat quality indices at different levels

2.3　陕北多沙粗沙区生境退化度动态变化分析

生境退化度能够反映生境受胁迫因子的影响程度，其取值在[0, 1]，值越大代表退化程度越高。将生境退化指数按照等间距法分为弱、较弱、中等、较强、强5个等级，从整体分布来看(图6)，陕北多沙

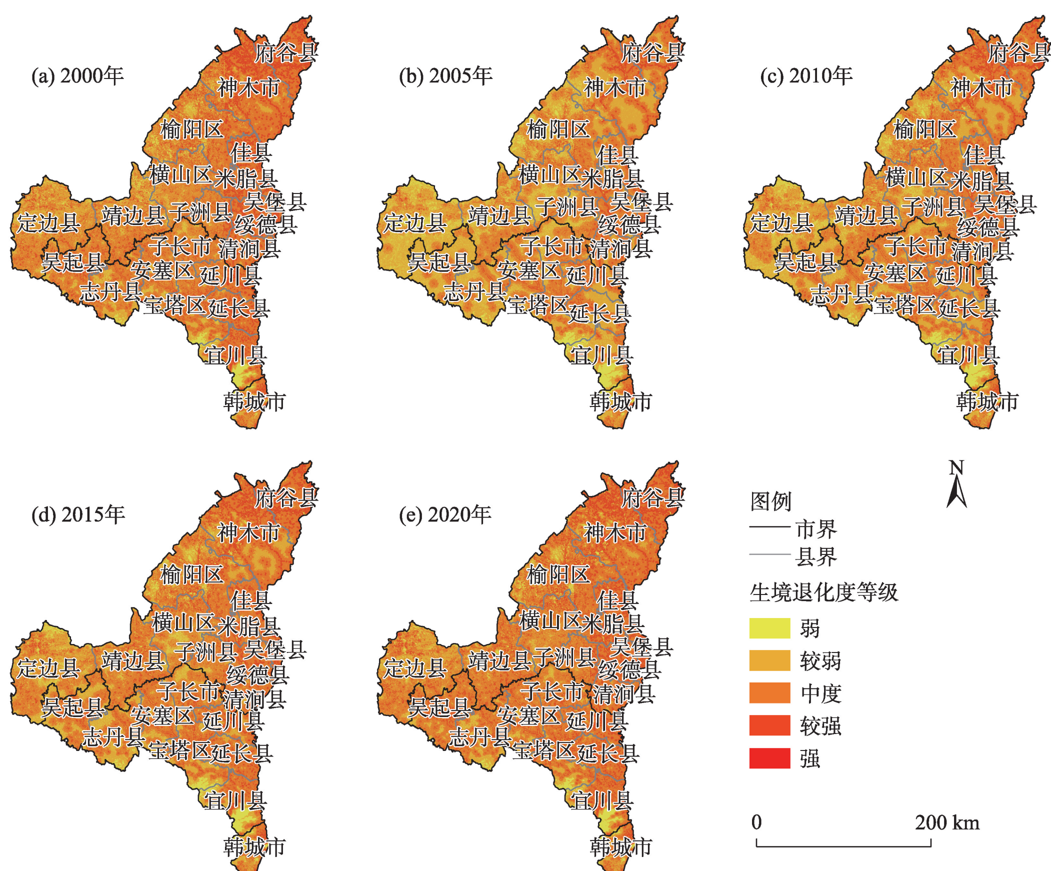


图6 陕北多沙粗沙区生境质量退化度等级

Fig. 6 Degradation grades of habitat quality in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi

粗沙区生境退化程度呈现中间强外围弱的效果，米脂、子洲等中部以旱地为主的区域退化等级普遍较强，而生境质量较高的志丹、宜川等县区生境退化度较弱，这些区域覆盖面积较大的草地、林地能减弱生境退化程度。

从陕北多沙粗沙区生境退化指数（表5）来看，2005—2015年整体退化程度较弱，2005年最低，为0.35，其后逐渐增加；2000年和2020年退化程度较高，说明后期生境下降的概率逐渐增大。结合生境质量退化度空间分布（图6）和土地利用来看，2015—2020年实行高标准农田建设，草地→耕地面积增加，导致生境退化程度较强。总之生境质量等级较高的区域退化程度一般较低（如宝塔区西南部等区域），反之退化程度较高（如绥德县中部、米脂县南部等区域）。

表5 陕北多沙粗沙区生境退化指数

Tab. 5 Habitat degradation indices in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi

年份	2000	2005	2010	2015	2020
生境退化指数	0.41	0.35	0.37	0.39	0.43

2.4 生境质量对土地利用变化的响应关系分析

陕北多沙粗沙区主要土地利用生境贡献率（表6）结合土地利用转移矩阵（表4）反映出生境质量变化与土地利用转移关系密切。按照生境增减来分析，生境增加主要是耕地向林地和草地转移导致植被面积增加，例如2000—2005年耕地→林地、耕地→草地转移面积分别为156.35 km²、1192.47 km²，生境质量分别增加0.0693%、0.3495%。裸土地作为生境质量胁迫因子之一，其向耕地、林地、草地转移均造成生境质量增加，2000—2005年，裸地→草地转移面积达1329.65 km²，生境质量增加0.90%，其后逐渐减少。生境减少主要是耕地向建设用地和裸地转移，林地向其他地类转移也会造成生境下降，例如2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020年林地→草地面积分别为81.63 km²、84.46 km²、3.10 km²、18.58 km²，其生境质量分别下降0.0018%、0.0178%、0.0006%、0.0037%，由此看出林地面积生

表6　陕北多沙粗沙区主要土地利用生境贡献率

Tab. 6　Contribution rates of major land use habitats in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi

年周期	土地利用	生境贡献率/%			
		耕地	林地	草地	裸地
2000—2005	耕地	0.0000	−0.0067	−0.1110	0.1424
	林地	0.0693	0.0000	0.0676	0.0151
	草地	0.3495	−0.0018	0.0000	0.9186
	建设用地	−0.0042	0.0000	−0.0120	0.0000
	裸地	−0.0261	−0.0011	−0.0886	0.0000
2005—2010	耕地	0.0000	−0.0078	−0.2677	0.0498
	林地	0.0411	0.0000	0.0475	0.0050
	草地	0.2096	−0.0178	0.0000	0.3353
	建设用地	−0.0057	0.0000	−0.0186	0.0000
	裸地	−0.0227	−0.0011	−0.1560	0.0000
2010—2015	耕地	0.0000	−0.0011	−0.1141	0.0471
	林地	0.0168	0.0000	0.0212	0.0013
	草地	0.0719	−0.0006	0.0000	0.3618
	建设用地	−0.0051	0.0000	−0.0198	0.0000
	裸地	−0.0083	0.0000	−0.0597	0.0000
2015—2020	耕地	0.0000	−0.0036	−0.1600	0.0484
	林地	0.0087	0.0000	0.0082	0.0023
	草地	0.0505	−0.0037	0.0000	0.1755
	建设用地	−0.0091	−0.0001	−0.0260	0.0000
	裸地	−0.0179	−0.0002	−0.1047	0.0000

境质量联系紧密。草地向耕地、建设用地和裸地转移引起生境质量下降，尤其是向裸地转移面积保持较高水平，削弱了生境质量的恢复水平。综上，生境质量对土地利用类型的转移较为敏感，在研究区内，退耕还林政策有效降低了裸地面积使生境质量提升，但同时自然资源的开采也导致了一部分林地和草地转成裸地和建设用地，为生境恢复带来威胁。

3　讨　论

3.1　土地利用类型转移分析

陕北多沙粗沙区土地利用以耕地、有林地、草地、建设用地和裸地为主，同时也是转移变化过程中的主要地类，旱地极易转为草地，裸地极易转为旱地、草地，草地极易转为旱地和林地，这与该地区的生产生活习惯[24]以及长时效的生态政策[25]密不可分。1999年实行退耕还林的生态政策增大了草地和林地面积，也促进了裸地向草地、林地转化，生态状况好转。但随着城市发展需求不断增大，林地、草地面积逐年减少，2000—2005年，耕地→草地、耕地→林地面积分别为1192.5 km^2、156.4 km^2，林地、草地→耕地面积总计仅755.5 km^2，草地→建设用地面积为33.2 km^2，同样转化关系的地类在2015—2020年分别变为298.2 km^2、25.1 km^2、740.7 km^2和67.0 km^2，这与冀泳帆等[26]通过计算发现林地和草地向耕地转移占比较大、建设用地面积激增，导致地区发展不均衡的研究一致。陈乐等[27]研究表明耕地扩张虽然能缓解绿洲与荒漠交错带的干旱程度，但侵占了草地覆盖，不利于草地生态稳定。所以，如何解决土地利用协同发展，优化土地利用布局是陕北多沙粗沙区目前乃至将来着力解决的问题。

3.2　生境质量及退化度演变分析

从生境质量来看，毗邻子午岭国家生态保护区的陕北多沙粗沙区西南部生境质量最高，其次毛乌素沙漠所在地靖边县生境质量由2000年的低等级为主、较低等级次之逐渐恢复到中级，并有零星较高和高等级出现，分析可能是沙漠飞播造林技术使得毛乌素沙漠区域的林地、草地面积增加，生境质量恢复。从生境退化度来看，旱地分布广泛的中部区域退化度明显高于外围地带，而林地覆盖面广的

西南部绿地带生境退化度普遍较低。从生境质量对土地利用的响应方面来看，生境质量对土地利用转移变化较为敏感，转化成林地、草地、湿地和水体能够有效提升生境质量，建设用地、裸地和耕地则会对生境质量的提升造成阻碍，这与胡丰等[28]针对渭河流域生境质量的研究结果一致，后续建设用地开发、耕地扩张应该引起关注。

3.3 后续生态保护及研究建议

相较于对大范围研究区开展生态质量评价，划定局部区域的研究能更精准地反映其生态质量以及存在的问题，以便于因地制宜开展保护措施。为进一步促进陕北多沙粗沙区生态恢复，应从以下2个方面着手：一是坚持当前生态政策，继续推行退耕还林还草、飞播造林等措施，扩大有效林地覆盖持续增加；二是耕地、建设用地扩张应适度，既要制止耕地向外转移，也要防止耕地侵犯林草、水域等地类，工矿、资源生产用地扩张应遵循“边保护边开发”原则，适当扩大湿地和水体用地。后期对于具体地域的生态评价，建议按照生态边界、生产生活习惯等划定小区域开展研究；另外，尽管InVEST模型已经进行多次迭代并广泛运用，但因其中相关参数的设定主要来源于专家评分及参考类似研究区的文献设定，后续研究应当进一步优化参数设定以及全面考虑影响生境质量的其他因子作用。

4 结 论

（1）陕北多沙粗沙区土地利用主要以旱地、有林地、草地、建设用地和裸土地为主，2000—2020年裸土地、草地、旱地变化面积最大，湿地、其他林地、水体变化面积占比较低。

（2）2000—2020年裸地转出面积最大，总降幅达57.11%，建设用地总增幅达272.69%，综合土地利用动态度从1.32降至0.61，区域土地利用变化趋于稳定。

（3）生境质量指数呈先增后减趋势，峰值达0.43，整体偏低，耕地扩张侵犯绿地面积，威胁生境质量恢复；2000、2020年退化程度较高，退化指数分别为0.41和0.43，未来生境有恶化趋势。

参考文献（References）

[1] 石小伟，冯广京，苏培添，等. 大都市郊区土地利用时空演变特征与生境质量评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 275-284. [Shi Xiaowei, Feng Guangjing, Su Peitian, et al. Spatiotemporal evolution of land use and habitat quality assessment in the suburbs of metropolitan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 275-284.]

[2] 徐文彬，饶良懿. 土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5114-5124. [Xu Wenbin, Rao Liangyi. Impacts of land use and climate change on ecosystem services in agro-pastoral ecotone[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 5114-5124.]

[3] 王军，顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808. [Wang Jun, Dun Yaolong. A review on the effects of land use change on ecosystem services[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 798-808.]

[4] Admasu S, Yeshitela K, Argaw M. Impact of land use land cover changes on ecosystem service values in the Dire and Legedadi watersheds, central highlands of Ethiopia: Implication for landscape management decision making[J]. Heliyon, 2023, 9(4): e15352, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15352.

[5] 许宝荣，刘一川，董莹，等. 基于InVEST模型的兰州地区生境质量评价[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 120-129. [Xu Baorong, Liu Yichuan, Dong Ying, et al. Evaluation of habitat quality in Lanzhou Region based on InVEST model[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 120-129.]

[6] 赵琪琪，李晶，刘婧雅，等. 基于SolVES模型的关中-天水经济区生态系统文化服务评估[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3673-3681. [Zhao Qiqi, Li Jing, Liu Jingya, et al. Assessment and analysis of social values of cultural ecosystem services based on the SolVES model in the Guanzhong-Tianshui Economic Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3673-3681.]

[7] 范秀梅，杨胜龙，张胜茂，等. 基于栖息地指数的阿拉伯海鲐鱼渔情预报模型构建[J]. 南方水产科学, 2020, 16(4): 8-17. [Fan Xiumei, Yang Shenglong, Zhang Shengmao, et al. Forecasting fishing ground of mackerel (*Scomber australasicus*) in Arabian Sea based on habitat suitability index[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(4): 8-17.]

[8] Xu H T, Song Y C, Tian Y. Simulation of land-use pattern evolution in hilly mountainous areas of north China: A case study in Jincheng[J]. Land Use Policy, 2022, 112: 105826, doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105826.

[9] 杨菡，李晓娜，邓忠坚，等. 基于土地利用/覆被的滇池流域生境质量时空演变[J/OL]. 生态学杂志. [2023-09-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230510.1245.002.html. [Yang Han, Li Xiaona, Deng Zhongjian, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Dianchi Lake Basin based on the land use/cover change[J/OL]. Chinese Journal of Ecology. [2023-09-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230510.1245.002.html.]

[10] Zheng W W, Li S M, Ke X L, et al. The impacts of cropland balance policy on habitat quality in China: A multiscale administrative perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2022,

323: 116182, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116182.

[11] Chen X, Yu L, Cao Y, et al. Habitat quality dynamics in China's first group of national parks in recent four decades: Evidence from land use and land cover changes[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116505, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116505.

[12] Yu N, Zhang X Y, Yang Y M, et al. Assessing the impacts of historical and future land-use/cover change on habitat quality in the urbanizing Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110147, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110147.

[13] 翟玉鑫, 张飞云, 马丽娜. 基于三生空间的博斯腾湖流域生境质量时空演变及预估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1792−1802. [Zhai Yuxin, Zhang Feiyun, Ma Lina. Evolution and prediction of habitat quality in Bosten Lake Basin based on production-living-ecological space[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1792−1802.]

[14] 陈实, 黄银兰, 金云翔. 退耕还林(草)工程实施前后黄河中游生境质量时空变化分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 456−468. [Chen Shi, Huang Yinlan, Jin Yunxiang. Spatiotemporal changes of habitat quality before and after the implementation of Grain for Green Project in the middle reaches of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 456−468.]

[15] Tang F, Wang L, Guo Y Q, et al. Spatio-temporal variation and coupling coordination relationship between urbanisation and habitat quality in the Grand Canal, China[J]. Land Use Policy, 2022, 117: 106119, doi: 10.1016/j.landusepol.2022.106119.

[16] de Montaigu C T, Goulson D. Habitat quality, urbanisation & pesticides influence bird abundance and richness in gardens[J]. Science of the Total Environment, 2023, 870: 161916, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161916.

[17] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 481−491. [Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects and influencing factors[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 481−491.]

[18] 刘啸. 陕北多沙粗沙区水土保持与区域经济可持续发展研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2004. [Liu Xiao. Research on water and soil conservation and regional economic sustainable development in the much macro-sand district of the northern area of Shaanxi Province[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2004.]

[19] 刘文超, 刘纪远, 匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1835−1852. [Liu Wenchao, Liu Jiyuan, Kuang Wenhui. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the Grain for Green Project in northern Shaanxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1835−1852.]

[20] 刘良云, 张肖. 全球30米地表覆盖精细分类产品V1.0[DB/OL]. [2021−08−23]. doi: 10.12237/casearth.6123651428a58f70c2a51e49. [Liu Liangyun, Zhang Xiao, Global 30-meter surface cover fine classification product V1.0[DB/OL]. [2021−08−23]. doi: 10.12237/casearth.6123651428a58f70c2a51e49.]

[21] Wei Q Q, Abudureheman M, Halikeet A, et al. Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109632, doi:10.1016/j.ecolind.2022.109632.

[22] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622−629. [Bao Yubin, Liu Kang, Li Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shaanxi Province as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 622−629.]

[23] 郑贱成, 谢炳庚, 游细斌. 基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 6997−7010. [Zheng Jiancheng, Xie Binggeng, You Xibin. Spatio-temporal characteristics of habitat quality based on land-use changes in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6997−7010.]

[24] 贺文敏, 王军西. 退耕还林后陕北丘陵区乡村聚落变迁问题解读——以吴起县吴起镇马湾村为例[J]. 建筑与文化, 2015(11): 149−151. [He Wenmin, Wang Junxi. Vicissitude and problem investigation of northern Shaanxi rural settlements after returning farmland to forests: As the example of Mawan Village Wuqi Township Wuqi County[J]. Architecture & Culture, 2015(11): 149−151.]

[25] 鲁亚楠, 姚顺波, 邓元杰, 等. 陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响——基于退耕还林(草)背景[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 180−192. [Lu Ya'nan, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. The effects of land use and landscape pattern change on ecosystem service values under the background of the sloping land conversion program in northern Shaanxi[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 180−192.]

[26] 冀泳帆, 贾鲁净, 杨联安, 等. 耦合InVEST-PLUS模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 123−132. [Ji Yongfan, Jia Lujing, Yang Lian'an, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 123−132.]

[27] 陈乐, 卫伟. 西北旱区典型流域土地利用与生境质量的时空演变特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1909−1918. [Chen Le, Wei Wei. Spatiotemporal changes in land use and habitat quality in a typical dryland watershed of northwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(9): 1909−1918.]

[28] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125−1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125−1136.]

Evolution and response analysis of habitat quality in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi based on land use change

AN Wenju[1,2], YU Yifan[1,2], HAO Shanshan[1,2], WANG Yingdi[1,2],
LI Xiaobing[1,2], MAI Xudong[1,2]

(1. Suide Administration Supervision Bureau of Soil and Water Conservation of the Yellow River, Yulin 718000, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of the Loess Plateau, Yulin 718000, Shaanxi, China)

Abstract: Due to the insufficiency of aiming at the problem of the evolution of habitat quality under the long temporal land use change in the more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi of China, we evaluated habitat quality and degradation over four annual cycles based on InVEST by reviewing land use type change and transfer matrices for 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020. The results show that: (1) Land use in the region is mainly dry land, forested land, grassland, construction land, and bare land. (2) From 2000 to 2020, the area of bare land transferred out was the largest, with a total decrease of 57.11%, mainly converted to grassland and cultivated land. The total increase of construction land reached 272.69%, the area of grassland transfer out and transfer in was the same, mainly converted with cultivated land, and the comprehensive land use dynamic decreased from 1.32% to 0.61%. (3) The habitat quality index first showed an increasing then decreasing trend, with a peak of 0.43, which was low overall, and the expansion of cultivated land posed a threat to habitat restoration. The habitat quality was higher in the region's southwest, the middle zone was mainly medium- and low-grade, and the habitat quality in the northern Shenmu and Fugu mining areas was high. The average habitat degradation index in 2000 and 2020 were 0.41 and 0.43, respectively, and there was a trend of future habitat deterioration. Thus, subsequent ecological governance policies should mainly focus on the prevention and control of cultivated land, construction land expansion, and protection of forest and grassland. The study results can provide a data reference for ecological restoration in north Shaanxi's more sediments and coarse sediments regions.

Key words: land use; transfer matrix; InVEST model; habitat quality